高齢者社会と調和する屋外搭乗型生活支援ロボットの安全エンジニアリング技術の開発

栗山 龍起[*1]　岡田 和也[*1]　関野 芳雄[*1]　有山 正彦[*1]　土肥 正男[*1]

Development of Safety Engineering Technology for Outdoor Mobile Personal Care Robots that Assists Aging Society

Tatsuyoshi Kuriyama[*1], Kazuya Okada[*1], Yoshio Sekino[*1], Masahiko Ariyama[*1], Masao Dohi[*1]

Abstract - We will perform risk assessment of the mobile personal care robots that have been put to practical use, and study and develop the safety measures in order to establish a transportation method which is indispensable for the restoration and reconstruction of the disaster-affected area by the Great East Japan Earthquake. In this paper, we report on our proposal plans for developing outdoor safety products of which the indoor type has proved effectiveness in factory automation field, applying functional safety technology to mobile personal care robots, and also developing safety engineering technology based on traffic engineering.

Keywords: safety, mobile, robot, outdoor and risk assessment

1.　はじめに

本稿では少子高齢化が進む社会で今後より一層必要となる、公共交通としてのローカルモビリティやパーソナルモビリティを実現するための安全対策について提案するものである。

提案する安全対策の要旨は国際安全規格の考え方に基づくハード的対策と、社会インフラや運用ルールを含めたソフト的な対策を合わせて行うもので、これらを合わせて安全エンジニアリングと定義する。また、既に高齢者を支援する形で普及・浸透している移動体に対して対策を実施することで新たに法令の整備を必要としないか、或いは最小限の規制で生活支援ロボットとして実用化できる可能性も高いと考える。具体的には電磁誘導線を敷設した誘導路を自動走行するゴルフカートと、搭乗者自身の操縦により走行する電動車いすを対象とする。これらにあらためて交通工学の観点での調査とリスクアセスメントを実施し、結果に応じて従来以上に安全対策することで、必要とされる地域や個人へ即時性を持って整備、或いはより広く普及促進することが目的である。

2.　屋外搭乗型生活支援ロボットとしてのゴルフカートとシニアカー

2.1　ゴルフカート

日本では自動制御や自動運転といったロボット技術が産業分野のみならず多くの分野で発達しており、独自進化しているものもある。ゴルフカートはその一つで、誘導線により誘導されるとは言え、無人でも走行させている例は世界でも珍しく日本独特のものである。

ゴルフ愛好者は日本だけでも960万人と多く、ゴルフ場利用者は年間のべ8000万人を越えている。また図1に示すように、70歳以上の高齢の利用者数だけが増加を続けており、現在では全体の約1割以上を占めている。ゴルフカートは、高齢者の行動の範囲および自由度を拡大する移動手段であり、誘導線の敷設と減速や停止命令のための磁石の埋設によって無人であっても目的地までの走行が可能な搭乗型移動ロボットであると考えられる。

2.2　ゴルフカートの事故実態

ゴルフカートは公道を走らない限り道路交通法の適用除外であるため、安全規格や整備基準が定められていない。大手損害保険会社 B 社の 1992 年から 18 年間に渡るゴルフ場施設利用損害保険の保険金支払いデータを分析したところ、ゴルフ場施設の事故の約半数がゴルフカートの事故であり、その内容は対人衝突、カートの横転や転落などの自損、カーブを曲がるときなどに同乗者が振り落とされる転落、カート同士の衝突などであった。こ

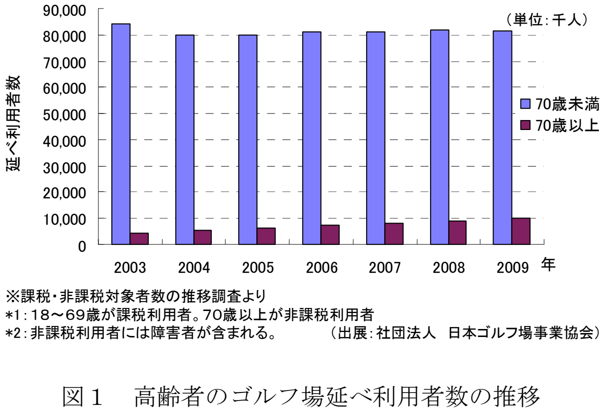

図１　高齢者のゴルフ場延べ利用者数の推移

*1: IDEC 株式会社
*1: IDEC Corporation

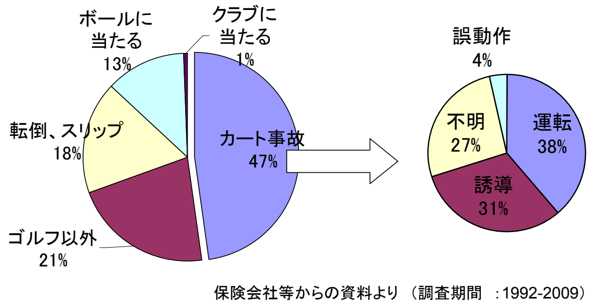

図２　ゴルフカートの事故状況の分析

れらを事故時の走行形態で分類すると図２に示すように30%以上が誘導走行時に発生していることが判明した。これにより誘導による自動走行に対する安全対策が不十分であることわかる。原因としては、ゴルフカートが不特定多数の歩行者やゴルフプレーヤーと同一空間を共有することに加え、プレーヤーへの配慮のためにガソリン車からバッテリー駆動車が主流になってきており接近音が小さいこと、プレーヤーがプレーに集中していることなどが考えられる。またデータによればゴルフカートが見えない死角からリモコン操作によって発進させることがあることも大きな原因である。これに対し安全対策についてゴルフ場をヒアリングしたところ、障害物検知装置はメーカーで用意されているが、誤動作が多いため使用を敬遠するゴルフ場が多いということであった。環境の過酷さから超音波タイプが採用されている。

2.3　シニアカー

電動車いすも免許を必要とせず、法令上は歩行者として扱われる。最近の傾向としては身体障害者だけでなく足腰が弱くなった高齢者に普及しており、スクーターのようなハンドル形のものが多くなってきていることである。業界団体である電動車いす安全普及協会によると、電動車いすの 1986 年からの累積出荷台数 57.3 万台のうち 75%がハンドル形である。今回は今後も主流になると考えられるハンドル形（以下シニアカー）を対象とする。

2.4　電動車いすの事故実態

電動車いすの事故については製品評価技術基盤機構（以下 nite）のホームページで開示されている事故情報を元に、重大事故に絞ってその原因を分析した。

その結果、図３に示すようにシニアカーの死亡事故原因の 70%は道からの転落であることが判明した。多くは誤使用、すなわち搭乗者の操縦ミスと判断されるため、製造者側の責任が問われることがなく安全対策が遅れていると考えられる。

3.　産業分野の安全の考え方と安全エンジニアリング

3.1　国際規格の安全の考え方

ここで産業分野における安全対策について説明する。

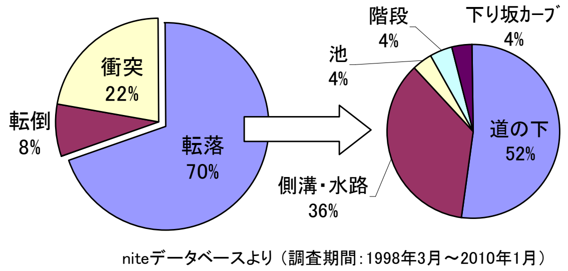

図３　電動車いすの死亡事故原因

まず国際規格の中では、安全とは「受け入れ不可能なリスクがない」状況と定義されており、安全対策とはリスクを調査しその結果必要に応じて「許容可能なレベル」までリスクを低減することであると定義されている。また生産機械に対する労働者のための安全を機械安全と呼んでおり、この分野に関する安全対策すなわちリスクアセスメントからリスク低減の方策について ISO、IEC 国際規格では、図４のようなピラミッド型の３層構造を構成し体系的に規定している。産業機械分野ではここで示される（A）安全対策の基本概念や原則、（B）そこから派生する具体的安全対策の共通規格、（C）それぞれの機械に固有に要求される個別機械安全規格、に従うことによって論理的、体系的且つ客観的に安全対策していくことができる。

3.2　リスクアセスメント

リスクアセスメントについては図４の ISO12100 において定義されている。手順としてはまず対象となる機械類における危険源を抽出してその危険源によるリスクを見積り、評価する必要があり、安全対策の前の調査段階である。ただしリスクアセスメントは取り組む人間の知識や経験、センスによりその精度が大きく左右される。

3.3　３ステップメソッド

リスクアセスメントの結果、受け入れられないリスクを対象にリスク低減することが安全方策である。安全方策は３ステップメソッドという３段階の手順を踏む必要がある。第１ステップは本質的に危険源をなくしたり危険源の危険度合いを直接下げる取り組みのことで、電圧や温度を低くする、速度を落とす、角を丸める、重い物を軽くする、などがこれにあたる。第２ステップは危険源を隔離する安全防護を実施し、それ以上ほか方法がない場合は最後の手段である第３ステップとして取扱説明書などによる情報提示や注意喚起による対策を行う。

3.4　安全防護

機械類では、組み立てや加工のために機械類が機能できるように大きなエネルギーを必要とするため本質的安全設計方策には限界があり、多くの場合は第２ステップの隔離によって安全方策することが有効である。隔離と

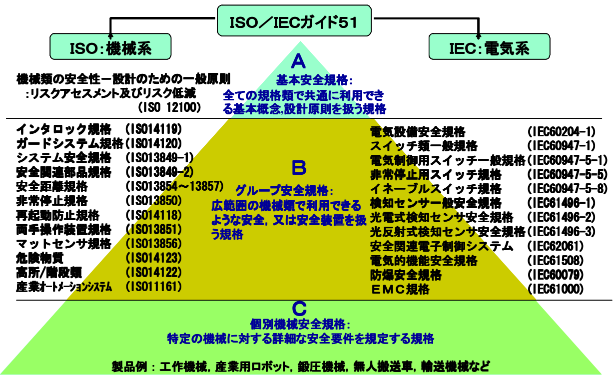

図４　機械安全分野の国際規格の階層構造

は機械類と人間の隔離であり、時間的な隔離と空間的な隔離の２種類がある。時間的な隔離とは、機械類と人間が同じ空間を共有するとき機械を停止することであり、同じ時間に動作しないことである。空間的な隔離とは柵や距離によるものである。

3.5　機能安全システム

図５は安全関連部を設けた制御システムである。このようなシステムでは隔離のために人体検知装置や非常停止装置などの全ての許可を得た場合のみ機械を起動できるようにしている。このように隔離（停止）による安全防護は単純な論理に基づいており、客観的に機能する安全方策であることが容易に理解できるが、このとき機械類を停止する制御システムそのものが正常に機能することも重要である。この観点で電子制御を含めて安全対策する考え方を機能安全という。機能安全の国際規格では安全関連部や安全機器の故障率と、それらの故障を検知する自己診断が及ぶ度合いを見積り、安全度水準（Safety Integrity Level 以下 SIL）として表現している。SIL はリスクの大きさに応じて求められ、客観的な安全度合いを表す。[2]

3.6　安全エンジニアリング

消費生活の分野では生産現場と比較してリスクが小さいこともあり、リスクアセスメントなどの安全の取り組みが法令化されていない。幼児や高齢者など消費者の多様性が問題になることが多く、どちらかと言えば誤使用の予見に安全対策の重きが置かれている現状がある。一方産業分野では、大きなエネルギーを扱うことが多いので事故発生時の危害が大きいため、安全に対する意識が高く早くから技術的な安全方策について理論が構築されてきたと言える。当社では産業分野において、国際規格に基づいた安全方策のための機器（以下安全機器）を開発するとともに、人材育成することでリスクアセスメントの精度を上げて安全方策を提案する安全コンサルティングを長年行ってきている。ゴルフカートや電動車いすのような搭乗型ロボットに対しては、産業機械同様にリスクアセスメントを実施し国際規格に基づく安全機器と機能安全による制御を行い、従来産業分野で実施してきた安全コンサルティングを適用することを提案する。

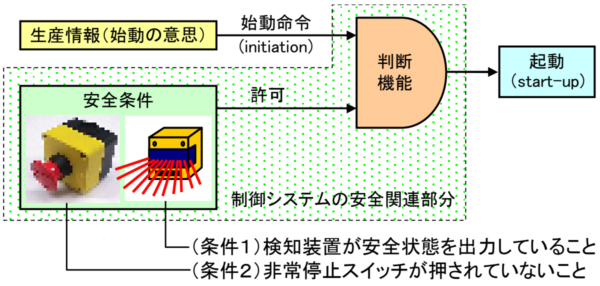

図５　制御システムの安全関連部

4.　搭乗型ロボットのリスクアセスメント

4.1　ゴルフカートのリスクアセスメント

まず仕様書と事故情報からゴルフカートのリスクアセスメントを実施する必要がある。一般的な５人乗りゴルフカートは全長 3500mm 幅 1300mm 程度で、５人搭乗時には総重量 1t 以上に及ぶ。速度は誘導時、最高で 12km/h、停止の加速度はある程度制御可能である。2.2 項の事故情報分析では誘導走行の事故はほとんど対人・対物衝突である。一番大きなリスクはプレーヤーやキャディなどに対する後ろからの衝突である。

4.2　シニアカーのリスクアセスメント

電動車いすは長さ 120cm、幅 70cm、高さ 109cm 以下の大きさ、最大重量 100kg、走行速度 6km/h である。nite の事故情報データベースを分析することでリスクアセスメントを行った。nite のデータベースでは一番大きなリスクは 2.3 項の通り転落であり、歩行者や障害物との衝突はほとんどなかった。転落では悪路から路肩に転落する場合が多く、運転者の過失として扱われることから、安全対策がなされてこなかったと考える。しかし身体能力の低い高齢者が使用者の多くであることを考慮した場合、操縦ミスは予見される誤使用として安全対策されるべきであると考える。

5.　必要な安全方策

5.1　ゴルフカートの安全方策

ゴルフカートに関しては誘導で走行する限りにおいて走行安定性の問題は少なかった。誘導走行の事故の多くはコース間を移動する経路を共有する歩行者との接触であるため、必要となる方策は歩行者検知と確実な停止、予期せぬ起動の防止、または第三者の操作による確実な停止である。

5.2　シニアカーの安全方策

最も重大な死亡事故の主な原因は側溝や道路脇からの転落である。多くは取扱説明書で禁止されている悪路走行の結果として処理されているがリスクの大きさから対策の必要があると判断し、安全方策を策定する必要がある。中には道の寸断に気がつかずに側溝に転落するケースもあり、座ることによる視界の悪化といった、新しく考慮しなければならない要素も浮かび上がってくる。いずれにしてもこれらを解決するために落差を検出することが最も優先度が高い安全方策であり、この検出信号を得て減速或いは停止することが必要である。

5.3　機器開発

ゴルフカートとシニアカーの安全方策に共通するものは屋外使用の検出機器の開発である。検出方法としては、移動体に必要な検出角度の広さと検出の方向と距離精度から、また既に機能安全認証された実績があることからレーザスキャナとする。[1]　今回、屋外における太陽光対策のために鉛直方向に角度をもって走査すること、水滴の付着による誤動作を回避することを課題に、図６に示すような新しいレーザスキャナを開発する予定である。

また、図７に示すような付加保護方策として第三者による非常停止装置を検討する。移動体を停止するために無線技術を使った非常停止装置の導入が必要となる。当社が開発した安全無線技術を利用した非常停止装置を屋外環境に合わせた改良を施す計画である。[3]

上記の安全機器を安全コントローラにより制御し、SIL2 の機能安全システムとする。[4]

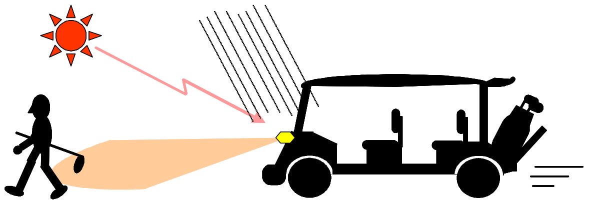

図６　屋外対応の障害物検知装置

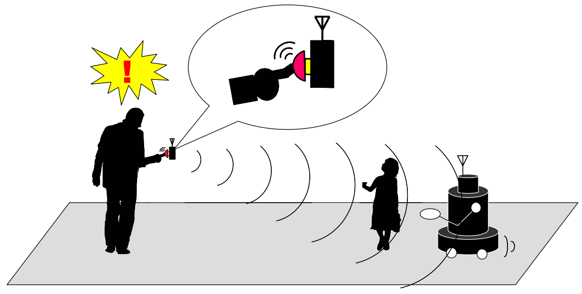

図７　安全無線を用いた非常停止装置

6.　まとめ

本稿は本年度から３年間かけて進めていく研究開発プロジェクトにおける初年度での調査分析結果と必要な対策について述べたものである。本研究開発プロジェクトは直接搭乗型ロボットを開発するものではなく、屋外で稼働するロボットに共通して必要なキーコンポーネントを開発し、制御システムに安全関連部を設けて機能安全化することで停止を基本とした安全方策を行う提案である。搭乗型ロボットとして既に広く普及している車体を利用し対策することで、早期に実用化でき、震災復興を支援するひとつの可能性となれば幸いである。

謝辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託事業「生活支援ロボット実用化プロジェクト」において平成２２年に採択され、「安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットの開発」として補助金の交付を受けて行っているものです。

本論文の執筆にあたり多大なご助言をいただきました関係者の方々に深く感謝いたします。

参考文献

[1]　IEC61496-3(2008); Safety Of Machinery - Electro-Sensitive Protective Equipment - Part 3 : Particular Requirements For Active Opto-Electronic Protective Devices Responsive To Diffuse Reflection

[2]　IEC 62061(2005); Safety of Machinery-Functional Safety of Safety-Related Electrical, Electronic and Programmable Electronic Control Systems

[3]　Manabu Shutto, Hitoshi Aisu, Takayoshi Shimizu, Masao Dohi, Tomonori Nishiki: “Proposal of next-generation emergency stop switch utilizing safe wireless communication for mobile robot applications”; 6th International Conference “Protective devices and systems” SIAS2010, Finland, 14-15 June, 2010

[4]　Norifumi Ohsugi, Takayuki Shimizu, Masao dohi, Tomonori Nishiki: “Development of the next-generation easy-to-use safety controller suitable for various industrial applications”; 6th International Conference “Functional Safety” SIAS2010, Finland, 14-15 June, 2010